МАССОВАЯ РАДИО БИБЛИОТЕКА

Ю. В. ЗАЙЦЕВ
А. Н. МАРЧЕНКО

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СТАБИЛИТРОНЫ



МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

СПРАВОЧНАЯ СЕРИЯ

Выпуск 720

Ю. В. ЗАЙЦЕВ и А. Н. МАРЧЕНКО

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СТАБИЛИТРОНЫ



«ЭНЕРГИЯ»

МОСКВА 1969

6Ф2.13
З12

УДК 621.382.2.072.2.:546.28

Зайцев Ю. В., Марченко А. Н.

З 12 Полупроводниковые стабилитроны, М., изд-во «Энергия», 1969.

40 с. с илл. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 720)

В брошюре описаны конструкции и приведены параметры кремниевых стабилитронов отечественного производства, а также ряд практических схем с использованием этих полупроводниковых приборов.

Брошюра предназначена для радиолюбителей, но может быть полезна и специалистам, работающим в области конструирования радиоаппаратуры.

3-4-5
383-68

6Ф2.13

Зайцев Юлий Владимирович

Марченко Александр Никитич

Редактор *Р. М. Малинин*

Технический редактор *О. Д. Кузнецова* Корректор *З. Б. Шлайфер*

Сдано в набор 3/II 1969 г. Подписано к печати 6/X 1969 г. Т-11559
Формат 84×108[1]/[32] Бумага типографская № 3
Усл. печ. л. 2,1 Уч.-изд. л. 2,47
Тираж 50 000 экз. Цена 10 коп. Зак. 2039

Издательство „Энергия". Москва, Ж-114, Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 10 Главполиграфпрома Комитета по печати при Совете Министров СССР. Шлюзовая наб., 10.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТАБИЛИТРОНОВ

Полупроводниковые стабилитроны составляют особую группу полупроводниковых диодов, рабочая точка которых в отличие от обычных выпрямителей в нормальном эксплуатационном режиме лежит на участке вольт-амперной характеристики, соответствующем состоянию пробоя *p-n* перехода. В таком режиме напряжение на приборе сохраняется примерно постоянным при изменении протекающего тока. При этом возможны два вида пробоя *p-n* перехода: лавинный и зенеровский.

Механизм лавинного пробоя можно представить следующим образом. Если к *p-n* переходу приложить обратное напряжение, то произойдет расширение области, обедненной свободными носителями заряда — электронами и дырками. Появляющиеся в этой области свободные носители заряда перемещаются под действием электрического поля и образуют обратный ток перехода. Пока обратное смещение невелико, этот ток остается постоянным, практически не изменяясь с изменением напряжения. При возрастании обратного напряжения до некоторой величины наблюдается резкое увеличение обратного тока. При этом свободные носители, образующие обратный ток перехода, ускоряются электрическим полем настолько, что приобретают энергию, достаточную для ионизации нейтральных атомов полупроводникового материала. В результате происходит образование новых носителей заряда, которые также ускоряются электрическим полем и при столкновении с атомами вызывают их ионизацию и т. д. Таким образом развивается процесс лавинообразного увеличения числа свободных носителей заряда в полупроводнике, вызывающий резкое увеличение обратного тока, т. е. пробой перехода. Несмотря на лавинный характер, процесс остается управляемым — незначительное изменение напряжения вызывает существенное изменение тока, протекающего через переход.

Напряженность электрического поля, при которой возникает лавинное умножение носителей заряда в кремниевых *p-n* переходах, равна примерно $5 \cdot 10^4$ *в/см*. В связи с тем, что необходимая для этого напряженность электрического поля постоянна для данного полупроводникового материала, напряжение пробоя возрастает с увеличением ширины *p-n* перехода:

$$U_{\text{пр}} = E_{\text{пр}} d, \qquad (1)$$

где $U_{\text{пр}}$ — напряжение пробоя *p-n* перехода;
$E_{\text{пр}}$ — напряженность электрического поля, при которой происходит лавинное умножение носителей заряда;
d — ширина перехода.

Так как величина d зависит от удельного сопротивления полупроводникового материала, то, используя материалы с определенным удельным сопротивлением, получают *p-n* переходы с заданным напряжением пробоя. Для сплавных кремниевых переходов напряжение лавинного пробоя определяется удельным сопротивлением исходного материала. Для материала *n*-типа

$$U_{\text{пр}} = 86\rho^{0,64} \qquad (2)$$

и для материала *p*-типа

$$U_{\text{пр}} = 23\rho^{0,75}, \qquad (3)$$

где ρ — удельное сопротивление материала, *ом · см*.

Лавинный пробой наблюдается лишь в достаточно широких

p-n переходах с напряжением пробоя более 6—7 *в*, т. е. в переходах, полученных на высокоомных материалах. Сужение перехода ниже некоторого предела исключает возможность возникновения лавинного пробоя, так как носители заряда не успевают приобрести на такой ширине перехода энергию, достаточную для ионизации нейтральных атомов.

При дальнейшем увеличении напряженности электрического поля в узких *p-n* переходах наступает зенеровский пробой. В этом случае увеличение числа носителей заряда в области перехода является результатом воздействия сильного электрического поля на кристаллическую решетку полупроводникового материала. Под влиянием такого поля разрываются связи, удерживающие валентные электроны в атоме, и образуются новые электронно-дырочные пары, приводящие к резкому возрастанию тока через переход. Для развития зенеровского пробоя необходима высокая напряженность электрического поля в области пространственного заряда, например, для кремния $1{,}4 \cdot 10^6$ *в/см*.

Многочисленные исследования показывают, что в *p-n* переходах с пробивным напряжением менее 5 *в* имеет место зенеровский пробой, а в переходах с пробивным напряжением более 6 *в* — лавинный. В диапазоне напряжения 5—6 *в* происходит наложение обоих механизмов пробоя.

Рассмотренные механизмы пробоя (лавинный и зенеровский) наблюдаются как у кремниевых, так и у германиевых *p-n* переходов. Однако в процессе пробоя германиевых *p-n* переходов выделяется значительное количество тепла, что приводит к возникновению дополнительных пар носителей заряда, маскирующих картину лавинного пробоя. В кремниевых же *p-n* переходах явлением тепловой генерации носителей можно пренебречь ввиду более высокой температурной стабильности кремния. Поэтому в качестве материала для полупроводниковых стабилитронов используется кремний.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТАБИЛИТРОНОВ

Напряжение стабилизации $U_{ст}$ или **напряжение пробоя** является одним из основных параметров полупроводникового стабилитрона. В паспортных данных на полупроводниковые стабилитроны указывается номинальная величина напряжения пробоя для нормированного значения тока через стабилитрон.

Отметим, что напряжение зажигания газонаполненных стабилитронов тлеющего разряда лежит в пределах 70—160 *в*, и получить меньшие значения напряжения практически не удается. Кремниевые же стабилитроны изготовляют с напряжением пробоя от единиц до нескольких сотен вольт. В настоящее время отечественной промышленностью серийно выпускаются приборы с напряжениями стабилизации от 5 до 400 *в* при допускаемом разбросе номинальных значений ±10%.

Вольт-амперные характеристики позволяют оценить качество стабилитронов с различными напряжениями пробоя. У кремниевых стабилитронов с напряжением стабилизации менее 6,5 *в* обратный ток увеличивается почти экспоненциально с увеличением приложенного напряжения и перегиб вольт-амперной характеристики в области пробоя довольно плавный. У кремниевых стабилитронов с напряжением стабилизации более 6,5 *в* переход в области пробоя резко выражен. Различие вольт-амперных характеристик связано с различием в механизмах пробоя. В первом случае имеет место зенеровский пробой, а во втором—лавинный. Типичные вольт-амперные характеристики низковольтных кремниевых стабилитронов приведены на рис. 1.

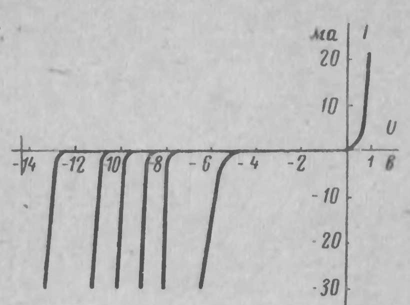


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики кремниевых стабилитронов малой мощности.

Минимальный ток стабилизации $I_{ст.мин}$ — такое значение тока через стабилитрон, при котором возникает устойчивый пробой.

Максимальный ток стабилизации $I_{ст.макс}$ ограничен допустимой мощностью рассеяния и зависит от температуры перехода. Величину максимального тока стабилизации можно определить как отношение предельной мощности рассеяния на стабилитроне к напряжению стабилизации. Максимальный ток полупроводникового стабилитрона может значительно превышать ток через стабилитрон тлеющего разряда. Промышленность выпускает стабилитроны с токами $I_{ст.макс}$ до 5 *а*.

Между значениями минимального и максимального токов стабилизации напряжение стабилизации (пробоя) изменяется незначительно. Вольт-амперная характеристика на этом участке приближается к прямой линии. В современных кремниевых стабилитронах область перегиба вольт-амперных характеристик занимает узкую зону.

Статическое сопротивление стабилитрона определяется как отношение напряжения стабилизации в данной точке вольт-амперной характеристики к току стабилизации в той же точке.

Динамическое сопротивление стабилитрона $R_д$ определяет влияние малых изменений тока на напряжение стабилизации; величина его равна тангенсу угла наклона вольт-амперной характеристики:

$$R_д = \frac{\Delta U_{ст}}{\Delta I_{ст}}, \tag{4}$$

где $\Delta U_{ст}$ — приращение напряжения стабилизации;
$\Delta I_{ст}$ — приращение тока стабилизации.

На рис. 2 приведена зависимость динамического сопротивления маломощных стабилитронов от величины напряжения стабилизации для различных значений токов стабилизации. У стабилитронов с низким напряжением стабилизации динамическое сопротивление резко падает при возрастании напряжения пробоя, достигая минимума при 7 *в*, после чего динамическое сопротивление растет с увели-

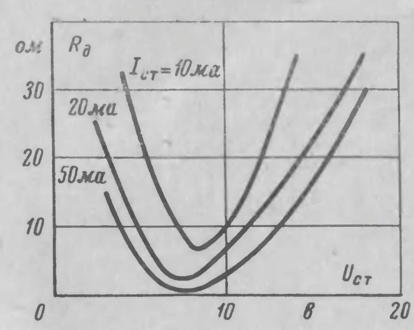


Рис. 2. Зависимость динамического сопротивления стабилитрона от напряжения стабилизации.

чением напряжения стабилизации почти линейно. Увеличение динамического сопротивления продолжается до больших величин напряжения стабилизации, достигая у высоковольтных стабилитронов типа СК50 400/100 500 *ом* при токе стабилизации 20 *ма*.

Из приведенных на рис. 2 кривых следует, что динамическое сопротивление для данного напряжения пробоя зависит от тока $I_{ст}$. При малых токах (в области перегиба вольт-амперных характеристик) оно велико и уменьшается с увеличением тока. Температура окружающей среды также оказывает влияние на динамическое сопротивление.

Максимальная мощность рассеяния стабилитрона $P_{ст.макс}$ определяется площадью его электронно-дырочного перехода и конструктивным оформлением. Величина номинальной мощности рассеяния стабилитронов различных типов указывается для определенных температур окружающей среды (или корпуса стабилитрона), исходя из максимально допустимой температуры *p-n* перехода. Мощность рассеяния связана с температурой следующим выражением:

$$T_п = P_{ст} R_т + T_о, \qquad (5)$$

где $T_п$ — температура электронно-дырочного перехода;
$P_{ст}$ — мощность рассеяния стабилитрона;
$R_т$ — тепловое сопротивление стабилитрона, характеризующее изменение температуры перехода при изменении рассеиваемой в стабилитроне мощности;
$T_о$ — температура окружающей среды.

Способность кремниевых стабилитронов выдерживать кратковременные перегрузки зависит от максимальной мощности рассеяния и теплового сопротивления прибора. Практика показывает, что полупроводниковые стабилитроны хорошо выдерживают кратковременные перегрузки.

Температурный коэффициент напряжения стабилизации (ТКН) определяет величину изменения напряжения стабилизации от температуры и зависит от номинального напряжения стабилизации, тока стабилизации, динамического сопротивления, температуры окружающей среды и теплового сопротивления прибора. Значение температурного коэффициента напряжения можно получить из выражения

$$ТКН = \frac{\Delta U_{ст}}{U_{ст} \Delta T}, \qquad (6)$$

где ΔT — изменение температуры;
$\Delta U_{ст}$ — изменение напряжения стабилизации, вызванное изменением температуры на величину ΔT.

ТКН положителен при $U_{ст} > 5 \div 6$ *в*, отрицателен при меньших его значениях и проходит через нуль при напряжении стабилизации

5—6 *в* (рис. 3). Зенеровскому механизму пробоя соответствует отрицательный, а лавинному—положительный ТКН. При значениях $U_{ст} > 6 \div 7$ *в* ТКН не зависит от протекающего через стабилитрон тока; такая зависимость наблюдается лишь при меньших значениях пробивного напряжения.

Значение ТКН изменяется с температурой, однако явно выраженная зависимость ТКН от температуры наблюдается лишь при напряжениях стабилизации 4—7 *в*. При $U_{ст}$ выше 6—7 *в* и ниже 4 *в* изменение температуры окружающей среды практически не оказывает влияния на ТКН.

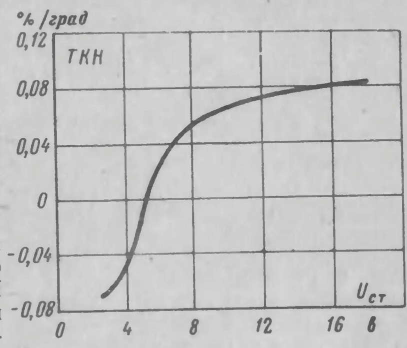


Рис. 3. Зависимость ТКН от напряжения стабилизации.

Если через стабилитрон протекает значительный ток, то необходимо учитывать вызванное этим током повышение температуры электронно-дырочного перехода и, следовательно, изменение напряжения стабилизации. Нестабильность напряжения стабилизации кремниевых стабилитронов при изменении температуры может быть значительно уменьшена температурной компенсацией. Методы температурной компенсации предполагают использование совместно с кремниевыми стабилитронами приборов с положительным и отрицательным ТКН. Компенсация будет совершенной лишь в том случае, если изменение температуры вызывает изменение падения напряжения на компенсирующих элементах, равное по величине и противоположное по знаку изменению напряжения стабилизации. На практике температурную компенсацию изменений напряжения стабилизации осуществляют последовательным включением с основным стабилитроном дополнительных диодов, смещенных в прямом направлении.

Диоды (стабилитроны), включенные в прямом направлении, имеют отрицательный ТКН, линейно изменяющийся с температурой и сравнительно мало зависящий от тока.

Динамическое сопротивление последовательной цепи в этом случае остается невысоким, а температурная компенсация получается весьма хорошей. На рис. 4 показано влияние температуры на напряжение стабилизации и на прямое падение напряжения на стабилитроне.

Стабильность параметров кремниевых стабилитронов особенно важна при использовании их в качестве источников опорного напряжения. У сплавных стабилитронов общего применения (к их числу относятся Д808—Д813, Д814, 2С156А, 2С168А) наблюдается увеличение $U_{ст}$ примерно на 0,2% от номинального значения в течение первых 5 000 *ч* работы. Далее увеличение $U_{ст}$ прекращается. Температурный коэффициент напряжения пробоя несколько уменьшается со временем. У диффузионных стабилитронов (типы СК1, СК2, СК50) наблюдается незначительное изменение параметров в течение первых 1 000 *ч* эксплуатации.

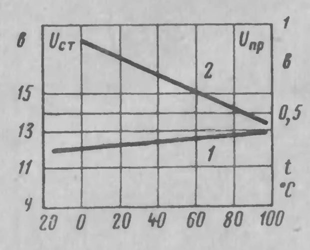


Рис. 4. График, показывающий влияние температуры на напряжение стабилизации (*1*) и на величину прямого падения напряжения стабилитрона (2).

Напряжение $U_{ст}$ кремниевого стабилитрона при включении или резком изменении протекающего через него тока достигает установившегося значения спустя некоторое время (время вхождения в режим), необходимое для установления теплового равновесия между прибором и окружающей средой. У приборов с различным конструктивным оформлением это время колеблется в пределах от 30 *сек* до 3—7 *мин.*

Влагостойкость стабилитронов. Стабилитроны работоспособны в условиях высокой влажности. Технические условия на отечественные типы стабилитронов разрешают эксплуатацию их при относительной влажности воздуха 90—98% при температуре 40° С.

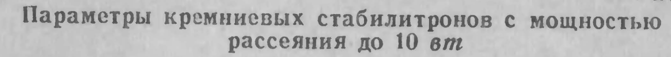
КОНСТРУКТИВНОЕ ОФОРМЛЕНИЕ И ПАРАМЕТРЫ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТАБИЛИТРОНОВ

Отечественная промышленность выпускает кремниевые стабилитроны с широким диапазоном напряжений стабилизации и с различной допустимой мощностью рассеяния, которые могут быть использованы в стабилизаторах напряжения, в системах регулирования, устройствах защиты от перегрузок, в ограничителях, в схемах формирования импульсов и др. Данные наиболее распространенных кремниевых стабилитронов приведены в табл. 1.

Стабилитроны малой мощности. Первыми отечественными полупроводниковыми стабилитронами являются кремниевые приборы типов Д808—Д811 и Д813. Буква Д в обозначении этих стабилитронов означает диод; первая цифра 8 — опорный или стабилизирующий; последние две цифры указывают среднее значение напряжения стабилизации. Выполняются диоды Д808—Д811 и Д813 в металлических герметичных корпусах с гибкими выводами (рис. 5,*а*). На рис. 6 показаны зоны разброса их напряжений стабилизации. При увеличении температуры окружающей среды выше 50° С допускаемая мощность рассеяния снижается на 2,8 *мвт/град* по сравнению с указанной в табл. 1 мощностью 280 *мвт*.

В дальнейшем была разработана серия кремниевых стабилитронов Д814А—Д814Д того же назначения. Первые два знака в обозначении этих стабилитронов (Д8) расшифровываются так же, как у приборов серий Д808—Д813, число 14 — порядковый номер разработки, последний знак (буквы *А*, *Б*, *В*, *Г*, *Д*) обозначает деление серии на типы. Эти стабилитроны изготовляют в металлическом герметичном корпусе со стеклянными изоляторами и гибкими выводами (рис. 5,*б*). Как видно из табл. 1, стабилитроны серии Д814 по сравнению с Д808—Д813 при температуре до 30° С рассеивают большую мощность. Зависимость максимально допустимой мощности рассеяния стабилитронов Д808—Д811, Д813 и Д814А — Д814Д от температуры приведена на рис. 7.


Таблица 1


Параметры кремниевых стабилитронов с мощностью рассеяния до 10 *вт*

Тип стабилитрона	Напряжение стабилизации* $U_{ст}$, *в*	Ток стабилизации, *ма*: $I_{ст.мин}$	Ток стабилизации, *ма*: $I_{ст.макс}$		Динамическое сопротивление $R_Д$ не более, *ом*: на рабочем участке**	Динамическое сопротивление $R_Д$ не более, *ом*: при $I_{ст.мин}$	ТКН, *%/град*	Максимальная мощность рассеяния, *вт*		Время вхождения в режим не более, *мин*
Д808	7—8,5	1	33		6	12	0,07	0,28		—
Д809	8—9,5	1	29		10	18	0,08	0,28		—
Д810	9—10,5	1	26	при 50° С	12	25	0,09	0,28	при 50° С	—
Д811	10—12	1	23		15	30	0,095	0,28		—
Д813	11,5—14	1	20		18	35	0,095	0,28		—
Д814А	7—8,5	1	40		6	12	0,07	0,34		—
Д814Б	8—9,5	1	36		10	18	0,08	0,34		—
Д814В	9—10,5	1	32	при 30° С	12	25	0,09	0,34	пр 30° С	—
Д814Г	10—12	1	29		15	30	0,095	0,34		—
Д814Д	11,5—14	1	24		18	35	0,095	0,34		—
Д815А, Д815АП	5,6	50	1 400		0,6	20	0,045	8		1
Д815Б, Д815БП	6,8	50	1 150		0,8	15	0,05	8		1
Д815В, Д815ВП	8,2	50	950		1	8	0,07	8		1,5
Д815Г, Д815ГП	10	25	800	при 90° С	1,8	15	0,08	8	при 90° С	2
Д815Д, Д815ДП	12	25	650		2	20	0,09	8		3
Д815Е, Д815ЕП	15	25	550		2,5	25	0,1	8		4
Д815Ж, Д815ЖП	18	25	450		3	30	0,11	8		4
Д816А, Д816АП	22	10	230		7	120	0,12	5		5
Д816Б, Д816БП	27	10	180		8	150	0,12	5		5
Д816В, Д816ВП	33	10	150	при 75° С	10	150	0,12	5	при 75° С	5
Д816Г, Д816ГП	39	10	130		12	150	0,12	5		6
Д816Д, Д816ДП	47	10	110		15	150	0,12	5		6
Д817А, Д817АП	56	5	90		35	200	0,14	5		7
Д817Б, Д817БП	68	5	75	при 75° С	40	200	0,14	5	при 75° С	7
Д817В, Д817ВП	82	5	60		45	300	0,14	5		7
Д817Г, Д817ГП	100	5	50		50	300	0,14	5		7

Тип стабилитрона	Напряжение стабилизации* $U_{ст}$, *в*	Ток стабилизации, *ма*		Динамическое сопротивление $R_д$ не более, *ом*		ТКН, %/*град*	Максимальная мощность рассеяния, *вт*	Время вхождения в режим не более, *мин*
		$I_{ст.мин}$	$I_{ст.макс}$	на рабочем участке**	при $I_{ст.мин}$			
2С156А	5,6	3	55 при 50° С	46	160	0,05	0,3 при 50° С	—
2С168А	6,8	3	45 при 50° С	28	120	0,06	0,3 при 50° С	—
2С920А, 2С920АП	120	5	42 при 75° С	100	500	0,16	5 при 75° С	—
2С930А, 2С930АП	130	5	38 при 75° С	120	800	0,16	5 при 75° С	—
2С950А, 2С950АП	150	2,5	33 при 75° С	170	1200	0,16	5 при 75° С	—
2С980А, 2С980АП	180	2,5	28 при 75° С	220	1500	0,16	5 при 75° С	—

Примечания: 1. Падение напряжения в прямом направлении на стабилитронах Д808—Д813, Д814А—Д814Д—1,0 *в*; для Д815А—Д817Г, Д815АП — Д817ГП, 2С920А — 2С980А, 2С920АП—2С980АП—1,5 *в*.

2. Максимальная величина прямого тока для стабилитронов Д808 — Д813 — 50 *ма*, Д814А—Д814Д — 100 *ма*, для 2С920А—2С980А и 2С920АП—2С980АП—1,0 *а*.

* Допускаемое отклонение напряжения стабилизации диодов серий Д815, Д816, Д817, 2С156А, 2С168А, 2С920А—2С980А от указанных в таблице номинальных значений не превышает ±10%.

** Для стабилитронов Д808—Д813 и Д814А—Д814Д при $I_{ст} = 5$ *ма*; для стабилитронов остальных типов при $I_{ст.макс}$.

Кремниевые стабилитроны 2С156А, 2С168А тоже изготовляют в металлических герметичных корпусах со стеклянными изоляторами и гибкими выводами (рис. 5,*в*). Обозначение этих приборов расшифровывается следующим образом: 2 — кремниевый; С — стабилитрон; 1 — малой мощности с напряжением стабилизации до 9,9 *в*; 56 и 68 — напряжение стабилизации (5,6 и 6,8 *в* соответственно; запятая в обозначении величины напряжения не указывается); А — первая модификация. При повышении температуры окружающей среды выше 50° С рассеиваемая стабилитроном мощность должна быть снижена в соответствии с графиком на рис. 7. В схемах точных стабилизаторов напряжения и тока и в различной измерительной аппаратуре применяют прецизионные кремниевые стабилитроны. В стабилитронах типов Д814А—Д818Е с малым температурным коэффициентом напряжения осуществлена компенсация положительного ТКН, работающего в режиме пробоя *p-n* перехода двумя другими *p-n* переходами, включенными в прямом направлении последовательно с первым переходом. Динамическое сопротивление таких компенсированных стабилитронов несколько выше, чем у некомпенсированных, но не превышает 18 *ом*.

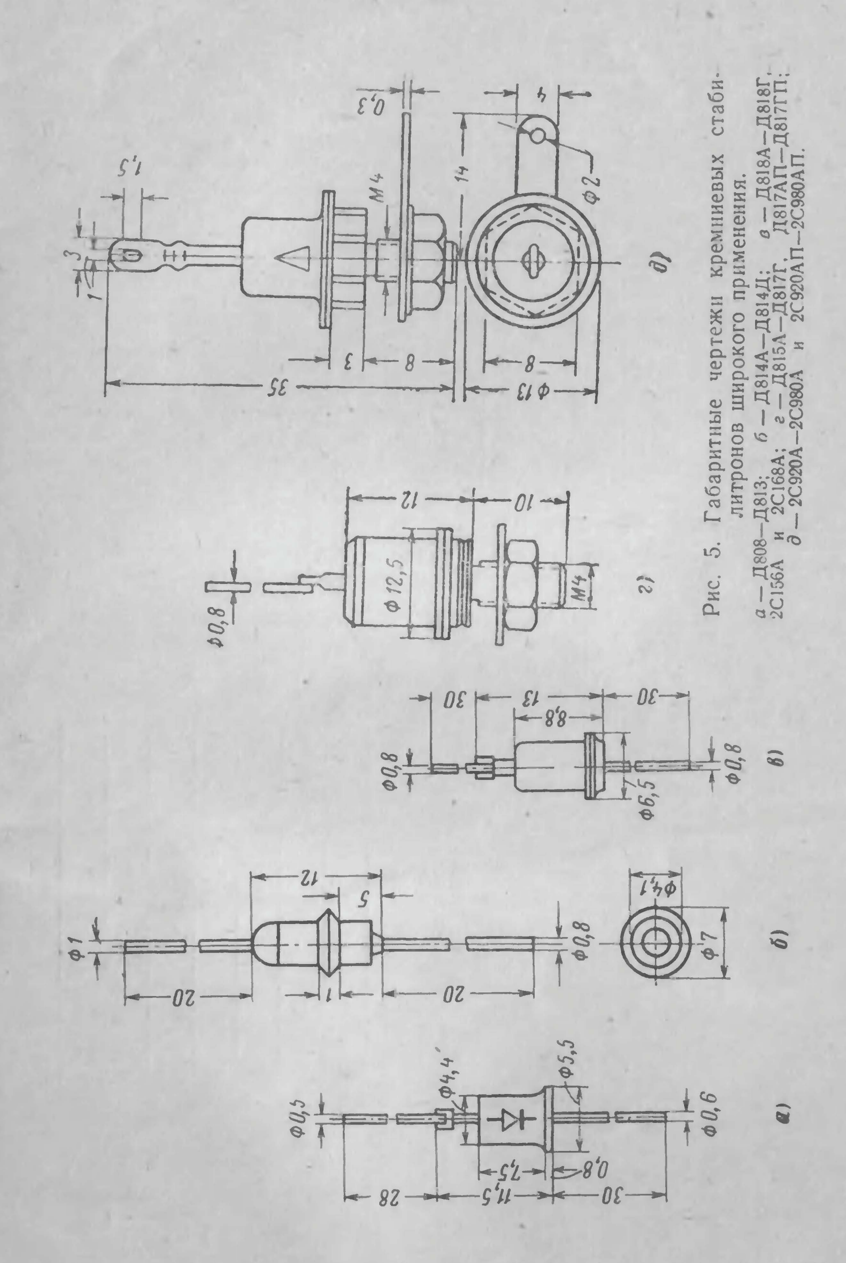


Рис. 5. Габаритные чертежи кремниевых стабилитронов широкого применения.

а — Д808—Д813; *б* — Д814А—Д814Д; *в* — Д818А—Д818Г, 2С156А и 2С168А; *г* — Д815А—Д817Г, Д817АП—Д817ГП; *д* — 2С920А—2С980А и 2С920АП—2С980АП.

При токе стабилизации 10 *ма* номинальное напряжение стабилизации приборов серии Д818 с любым буквенным индексом равно 9 *в*, максимальная мощность рассеяния — 0,3 *вт*, минимальный ток стабилизации — 3 *ма* и максимальный — 33 *ма*. Интервал рабочих температур от —60 до +120° С. Остальные параметры этих стабилитронов даны в табл. 2 (при токе стабилизации 10 *ма*). Как видно из таблицы, для стабилитронов всех типов, за исключением Д818А и Д818Б, знак ТКН не регламентируется, для стабилитронов типа Д818А ТКН положителен, а для стабилитронов типа Д818Б — отрицателен. Следует иметь в виду, что у приборов Д818В—Д818Е возможно изменение знака ТКН при сохранении абсолютного значения ТКН, указанного в табл. 2. Наиболее часто наблюдается изменение знака ТКН с температурой у стабилитронов Д818Д и Д818Е. Обозначение стабилитронов Д818А—Д818Е расшифровывается аналогично обозначениям приборов Д814А—Д814Д.

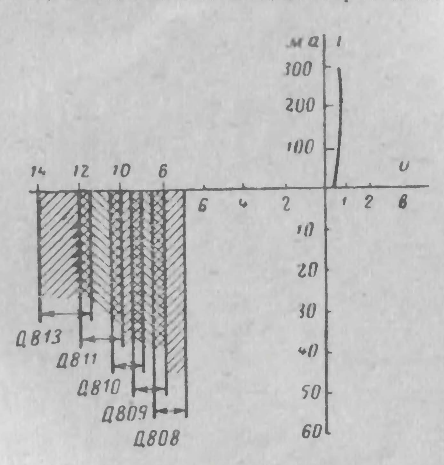


Рис. 6. Зоны разброса напряжений стабилизации диодов Д808—Д813.

Стабилитроны средней и большой мощности. Стабилитроны серий Д815, Д816, Д817 (обозначения расшифровываются аналогично обозначениям Д814А — Д814Д) обладают максимальной мощностью рассеяния 5—8 *вт* и охватывают широкий интервал напряжений стабилизации (см. табл. 1). Приборы заключены в герметичный металлический корпус со стеклянным изолятором, через который проходит гибкий вывод одного из электродов (рис. 5,*г*). Вторым выводом служит шпилька с резьбой в основании корпуса, предназначенная одновременно для электрического соединения в схеме и для крепления стабилитрона на радиаторе.

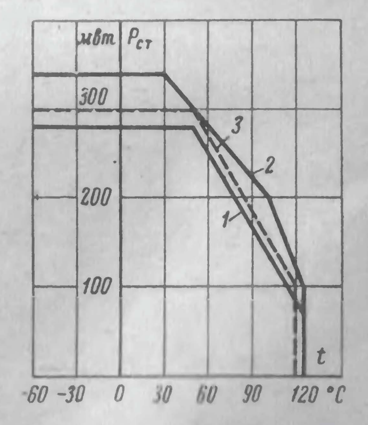


Рис. 7. Зависимость максимальной мощности рассеяния стабилитронов от температуры окружающей среды.

1 — Д808—Д813; *2* — Д814А—Д814Д; *3* — 2С156А—2С168А, Д818А—Д818Г.

Стабилитроны серий 2С920—2С980 конструктивно отличаются от стабилитронов серий Д815—Д817 тем, что изолированный вывод из них жесткий в виде лепестка под пайку (рис. 5,*д*). Обозначение этих стабилитронов расшифровывается следующим образом: 2 — кремниевый; С — стабилитрон; 9 — большой мощности с напряжением стабилизации от 100 до 199 *в*; по следующим двум цифрам (20, 30, 50 или 80) можно определить величину напряжения стабилизации, если прибавить число 100, А — первая модификация.

Таблица 2

Параметры прецизионных кремниевых стабилитронов малой мощности

Параметры	Типы стабилитронов					
	Д818А	Д818Б	Д818В	Д818Г	Д818Д	Д818Е
Допускаемое отклонение от номинального напряжения стабилизации, % . . .	+15	—15	±10	±5	±5	±5
Среднее значение ТКН, %/*град* . .	+0,02	—0,02	±0,01	±0,005	±0,002	±0,001
Уход напряжения стабилизации в диапазоне температур от —60 до +110° С не более, *мв*	+320	—320	±160	±80	±32	±16

Упомянутые стабилитроны средней и большой мощности выпускают с добавочным индексом П в маркировке или без него. У стабилитронов с индексом П с корпусом соединен катод, а у стабилитронов без индекса — анод. Параметры обеих разновидностей стабилитронов идентичны.

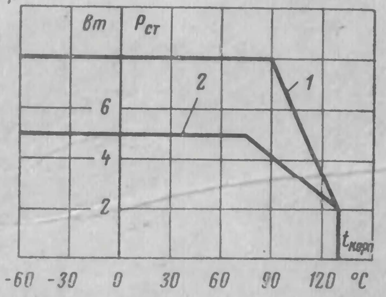


Рис. 8. Зависимость максимальной мощности рассеяния от температуры корпуса стабилитронов.

1 — Д815А—Д815Ж и Д815АП—Д815ЖП; *2* — Д816А—Д816Д, Д816АП, Д816ДП; Д817А—Д817Г, Д817АП—Д817ГП, 2С920А—2С980А и 2С920АП—2С980АП.

Стабилитроны Д815—Д817 допускают двукратную перегрузку по току в течение 1 *сек*. На рис. 8 приведены графики зависимости допустимой мощности рассеяния от температуры корпуса стабилитронов. Допустимая температура корпуса стабилитронов Д815—Д817 135° С, стабилитронов 2С920—2С980—130° С. Чтобы температура корпуса не превышала допустимой, радиатор должен иметь размер 70×70×2 *мм*; изготавливают его из листового алюминия.

Кремниевые стабилитроны СК1 и СК2 (рис. 9 и табл. 3) рассчитаны на длительную работу с естественным воздушным охлаждением при температуре окружающей среды от —40 до +65° С.

Таблица 3

Параметры кремниевых стабилитронов СК1 и СК2 большой мощности

Тип стабилитрона	Номинальное напряжение стабилизации* $U_{ст}$, *в*	Номинальный ток стабилизации** $I_{ст.ном}$, *ма*	Динамическое сопротивление $R_д$ не более, *ом*		ТКН, *%/град*
			при $I_{ст.ном}$	при $0,2 I_{ст.ном}$	
СК1 5,6/1000	5,6	1 000	0,5	0,8	0,045
СК1 6,8/1000	6,8	1 000	0,8	1,5	0,05
СК1 8,2/1000	8,2	1 000	1,0	2,0	0,07
СК1 10/500	10	500	1,5	2,5	0,08
СК1 12/500	12	500	1,8	3,0	0,09
СК1 15/500	15	500	2,2	3,5	0,1
СК1 18/500	18	500	3,0	4,5	0,11
СК1 22/150	22	150	4,5	7,0	0,11
СК1 24/150	24	150	6,0	8,5	0,12
СК1 28/150	28	150	8,0	12	0,12
СК1 30/150	30	150	10	30	0,12
СК1 36/150	36	150	12	45	0,12
СК1 43/150	43	150	14	60	0,12
СК1 51/150	51	150	25	70	0,12
СК1 62/50	62	50	30	80	0,14
СК1 75/50	75	50	35	100	0,14
СК1 91/50	91	50	40	100	0,14
СК1 110/50	110	50	45	110	0,14
СК1 120/50	120	50	50	112	0,14
СК1 150/50	150	50	55	150	0,15
СК1 180/50	180	50	60	150	0,15
СК1 220/25	220	25	80	300	0,15
СК1 270/25	270	25	110	400	0,15
СК1 300/25	300	25	150	500	0,15
СК2 5,6/2000	5,6	2 000	0,5	0,7	0,045
СК2 6,8/2000	6,8	2 000	0,7	1,2	0,05
СК2 8,2/2000	8,2	2 000	0,9	1,8	0,07
СК2 10/1000	10	1 000	1,0	2,2	0,08
СК2 12/1000	12	1 000	1,5	2,5	0,09
СК2 15/1000	15	1 000	2,0	3,0	0,1
СК2 18/700	18	700	2,5	3,5	0,11
СК2 22/300	22	300	3,5	5,0	0,12
СК2 24/300	24	300	4,0	6,0	0,12
СК2 28/300	28	300	5,0	8,0	0,12
СК2 30/300	30	300	8,0	25	0,12
СК2 36/300	36	300	9,0	30	0,12
СК2 43/300	43	300	10	35	0,12
СК2 51/200	51	200	12	45	0,12
СК2 62/200	62	200	25	60	0,14
СК2 75/100	75	100	30	80	0,14
СК2 91/100	91	100	35	90	0,14
СК2 110/100	110	100	45	100	0,14

Тип стабилитрона	Номинальное напряжение стабилизации* $U_{ст}$, *в*	Номинальный ток стабилизации** $I_{ст.ном}$, *ма*	Динамическое сопротивление $R_д$ не более, *ом*		ТКН, *%/град*
			при $I_{ст.ном}$	при $0,2 I_{ном}$	
СК 2120/100	120	1 000	50	100	0,14
СК 2150/100	150	100	55	120	0,14
СК 2180/100	180	100	70	200	0,15
СК 2220/50	220	50	80	300	0,15
СК 2270/50	270	50	100	350	0,15
СК 2300/50	300	50	120	450	0,15

* Допускаемое отклонение от номинального напряжения стабилизации ±10%.

** Значение номинального тока стабилитрона $I_{ст.ном}$ является одновременно предельно допускаемым при длительной работе стабилитрона с радиатором в условиях естественного охлаждения при температуре окружающей среды до 0° С.

Падение напряжения в прямом направлении для стабилитронов СК1 не более 1,5 *в* при токе 500 *ма*, для СК2 — не более 1,5 *в* при токе 600 *ма*.

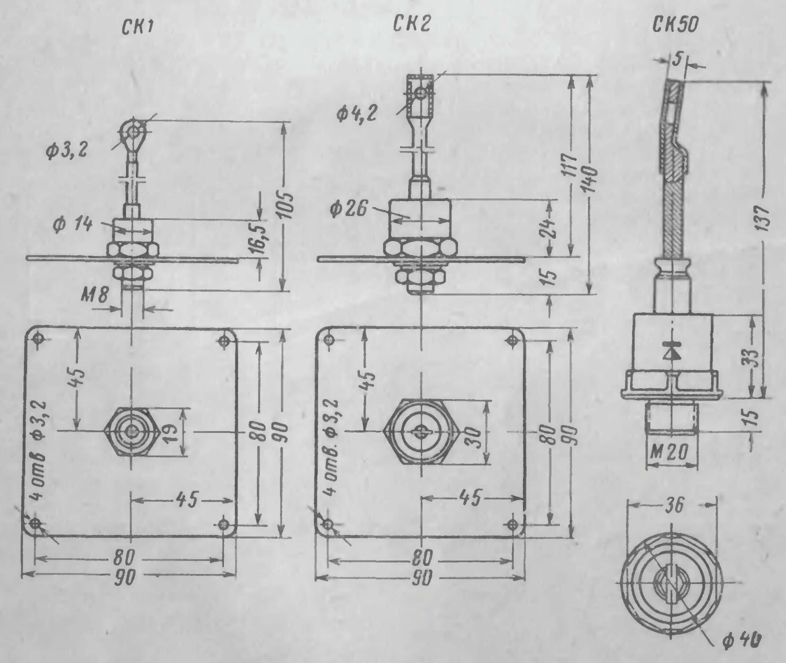


Рис. 9. Габаритные чертежи мощных кремниевых стабилитронов и нормированные размеры радиаторов для стабилитронов СК1 и СК2.

Обозначение этих стабилитронов состоит из четырех знаков: буквы СК означают стабилитрон кремниевый; второй знак указывает тип стабилитрона; третий — номинальное напряжение стабилизации в вольтах и четвертый—номинальный ток стабилизации в миллиамперах.

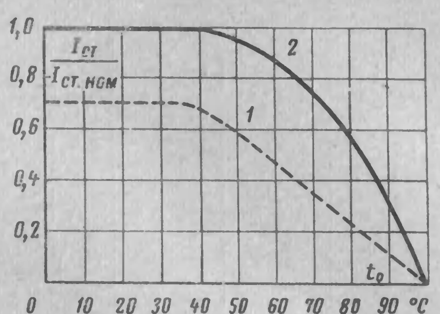


Рис. 10. Зависимость максимально допустимого тока стабилитронов СК1 и СК2 без радиаторов (*1*) и на радиаторах (*2*) от температуры окружающей среды.

Электрическое соединение электродов стабилитрона со схемой осуществляется через шпильку основания с гайкой (анод) и медный кабель с наконечником (катод). Отвод тепла от корпуса стабилитрона, как правило, должен осуществляться через радиатор.

На рис. 10 приведена зависимость допустимого тока $I_{ст}$ стабилитронов типа СК1 и СК2 от температуры окружающей среды. Из нижней кривой этого рисунка видно, что при работе стабилитрона без радиатора, если окружающая температура не более 35° С, рассеиваемая мощность должна быть снижена до 70% от номинальной. Применяя принудительное охлаждение стабилитронов (обдув струей воздуха), можно существенно повысить допустимую электрическую нагрузку. На рис. 11 приведена зависимость допустимого тока $I_{ст}$ от интенсивности принудительного охлаждения, а на рис. 12 — ампер-секундная характеристика стабилитронов, показывающая, какие кратковременные токовые перегрузки они способны выдерживать.

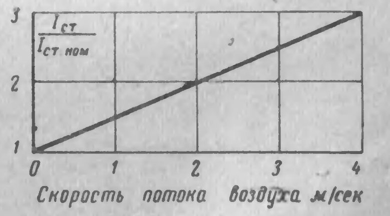


Рис. 11. График допустимого увеличения тока стабилитронов СК1 и СК2 при принудительном воздушном охлаждении.

Кремниевые стабилитроны типа СК50 (рис. 9) с мощностью рассеяния до 50 *вт* и напряжением стабилизации от 5 до 400 *в* надежно работают при температуре окружающей среды от —40 до +65° С. Основные их параметры при температуре окружающей среды 40±5° С приведены в табл. 4.

Обозначение стабилитронов складывается из четырех условных знаков: буквы СК означают стабилитрон кремниевый; число 50—максимальная мощность рассеяния в ваттах; третий знак указывает напряжение стабилизации в вольтах и четвертый — номинальный ток стабилизации в миллиамперах.

В этих стабилитронах применен монокристаллический кремний электронного типа проводимости с удельным сопротивлением 0,015—5 *ом·см*. Электронно-дырочный переход образован диффузией галлия в исходную кремниевую пластину. Для обеспечения до-

статочной механической прочности стабилизирующего элемента, гарантирующей надежную работу стабилитрона в тяжелых эксплуатационных условиях с ударными, вибрационными и термическими нагрузками, кремниевую пластину с *p-n* переходом располагают между двумя электродами из вольфрама, имеющего близкий с кремнием коэффициент теплового расширения и обладающего высокой теплопроводностью. Вольфрамовые электроды приплавляют к кремниевой пластине специальными сплавами.

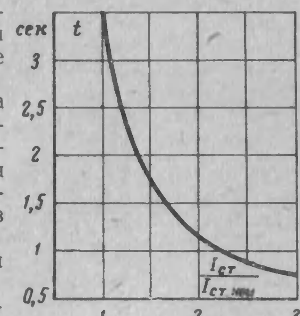


Рис. 12. Ампер-секундная нагрузочная характеристика стабилитронов СК1 и СК2.

Герметичный корпус стабилитрона обеспечивает отвод тепла от стабилизирующего элемента и его защиту от механических повреждений и воздействия окружающей среды. Крепление стабилитрона в схеме осуществляется через резьбовое соединение основания (анод) и медный гибкий провод с наконечником (катод).

Для обеспечения отвода тепла стабилитрон СК50 монтируют на пластинчатом алюминиевом радиаторе размером 100×100×2 *мм*.

Минимальный ток стабилизации $I_{ст.мин}$ для стабилитронов СК1, СК2 и СК50 при расчетах можно принимать равным $(0{,}15 \div 0{,}2) I_{ст.ном}$.

ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТАБИЛИТРОНОВ

При монтаже стабилитронов с гибкими выводами в аппаратуре пайка должна производиться низкотемпературным припоем при помощи маломощного (50—60 *вт*) паяльника в течение 2—3 *сек* с теплоотводом на выводе стабилитрона. Расстояние от места пайки до стеклянного изолятора или корпуса должно быть не менее 7—10 *мм*. Изгиб выводов допускается на расстоянии 2—3 *мм* от корпуса. Усилие, прилагаемое к гибким выводам, не должно превышать 2 *кГ*. Крепление стабилитронов за гибкие выводы не рекомендуется. Корпус таких приборов должен быть приклеен к монтажной плате или закреплен держателем.

У стабилитронов большой и средней мощности категорически запрещается изгиб верхнего жесткого вывода, так как при этом можно разрушить стеклянный изолятор.

Допускается последовательное электрическое соединение любого количества стабилитронов. При последовательном соединении стабилитронов серий Д815, Д816, Д817, 2С920, 2С930, 2С950, 2С980 и креплении их на одном теплоотводе целесообразно использовать приборы, имеющие индекс П. Допускается параллельное соединение стабилитронов одного типа при условии, что суммарная рассеиваемая на всех стабилитронах мощность не превышает допустимую мощность рассеяния одного стабилитрона данного типа.

Для получения высокостабильного эталонного напряжения при помощи стабилитронов Д818А—Д818Е следует возможно более точ-

но поддерживать номинальный ток стабилизации, равный 10 *ма*, что обеспечивает наилучшую стабильность параметров стабилитронов при изменениях температуры окружающей среды и тока стабилизации. При необходимости использовать их при токе стабилизации, отличном от номинального, не рекомендуется допускать увеличения этого тока выше 15 *ма* и уменьшения ниже 5 *ма*.

Таблица 4

Параметры кремниевых стабилитронов большой мощности, разработанных Всесоюзным электротехническим институтом им. В. И. Ленина

Тип стабилитрона	Напряжение стабилизации $U_{ст}$, *в*	Номинальный ток стабилизации $I_{ст.ном}$, *а*	Динамическое сопротивление не более, *ом*		ТКН, *%/град*
			при $I_{ст.ном}$	при $0,2\ I_{ст.ном}$	
СК50 5,6/4000	5,0—6,2	4	0,6	1	0,045
СК50 6,8/4000	6,1—7,5	4	0,8	1,5	0,05
СК50 8,2/4000	7,4—9,0	4	1,0	2	0,07
СК50 10/3000	9—11	3	1,8	2,5	0,08
СК50 12/3000	11—13	3	2,0	3	0,09
СК50 15/3000	13,0—16,5	3	2,5	4	0,1
СК50 18/2500	16,5—19,5	2,5	3	5	0,11
СК50 22/2000	19,5—24	2	5	7	0,12
СК50 24/2000	22—26	2	6	10	0,12
СК50 28/1500	25—31	1,5	8	15	0,12
СК50 30/1500	27—33	1,5	9	20	0,12
СК50 36/1000	32—40	1,0	10	25	0,12
СК50 43/1000	39—47	1,0	12	35	0,14
СК50 51/800	46—56	0,8	14	40	0,14
СК50 62/800	56—68	0,8	25	60	0,14
СК50 75/600	68—83	0,6	30	80	0,14
СК50 91/500	82—100	0,5	35	90	0,14
СК50 110/400	99—121	0,4	45	100	0,15
СК50 120/400	110—132	0,4	60	100	0,15
СК50 150/300	132—165	0,3	65	150	0,15
СК50 180/250	162—198	0,25	70	200	0,15
СК50 220/200	198—242	0,2	80	300	0,15
СК50 270/150	242—297	0,15	100	350	0,15
СК50 300/150	270—330	0,15	120	450	0,15
СК50 400/100	360—440	0,10	120	500	0,15

Работа стабилитронов серий Д815, Д816, Д817, 2С920—2С980, СК1, СК2, СК50 гарантируется только при жестком креплении их на теплоотводящих радиаторах. Для обеспечения достаточно эффективного охлаждения прибора радиатор должен изготовляться из материала, обладающего высокой теплопроводностью. Наиболее часто радиаторы изготовляют из алюминия, теплопроводность которого $\lambda=200$ *вт/м·град*. Медь, обладающая более высокой теплопроводностью ($\lambda=385$ *вт/м·град*), применяется лишь в исключительных случаях. Сталь обладает низкой теплопроводностью ($\lambda=10\div60$ *вт/м·град*), и поэтому использование ее для изготовления теплоотводящего радиатора обычно не рационально.

Важной характеристикой радиатора, показывающей, насколько затруднено рассеивание отводимого от стабилитрона тепла, является его тепловое сопротивление $R_{tр}$ (*град/вт*). Величина $R_{tр}$ зависит от материала, формы, площади поверхности радиатора и качества ее обработки. Требуемое тепловое сопротивление радиатора, при котором рассеивается мощность $P_{ст}$ при температуре корпуса стабилитрона не более $t_{к.доп}$ (см. рис. 8) и температуре окружающей среды $t_с$, вычисляется по формуле

$$R_{tр}=\frac{t_{к.доп}-t_с}{P_{ст}}-R_{tк.р}. \qquad (7)$$

Величина теплового сопротивления между корпусом стабилитрона и радиатором $R_{t\ к.р}$ при плотном прилегании их друг к другу составляет 0,5—1 *град/вт*. Площадь радиатора, который имеет форму квадратной пластины, изготовленной из алюминия, расположенной вертикально и свободно обтекаемой воздухом с обеих сторон, вычисляется по формуле

$$S=\frac{800}{R_{tр}}\ [см^2]. \qquad (8)$$

Толщина пластины должна быть не менее 0,02—0,025 размера стороны квадрата.

ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ СТАБИЛИТРОНОВ

Большое распространение в настоящее время получили полупроводниковые стабилизаторы напряжения питания. По сравнению со стабилизаторами на электронных лампах они отличаются высокой надежностью, экономичностью, меньшими весом и габаритом.

По принципу действия все стабилизаторы напряжения можно разделить на параметрические и компенсационные. Параметрическими принято называть стабилизаторы, у которых регулирующий элемент воздействует на стабилизируемую величину так, чтобы приблизить ее к заданной без оценки их разности. В компенсационных стабилизаторах напряжение на нагрузке сравнивается с заданным образцовым значением напряжения (опорное напряжение) и в зависимости от полученной разности производится воздействие на стабилизируемую величину так, чтобы уменьшить эту разность до допустимых значений.

Компенсационные стабилизаторы имеют обычно значительно больший коэффициент стабилизации по сравнению с параметрическими, однако последние более просты и надежны в эксплуатации. Малые габариты и вес, большое разнообразие типов кремниевых стабилитронов обеспечивают параметрическим стабилизаторам широкое применение в радиоаппаратуре.

Простейший параметрический стабилизатор. Наиболее простая и вместе с тем весьма распространенная схема параметрического стабилизатора постоянного напряжения приведена на рис. 13,*а*. Он представляет собой делитель напряжения, состоящий из резистора $R_б$ и стабилитрона *Д*. При изменении питающего напряжения $U_п$ напряжение на стабилитроне и на нагрузке $U_н$ изменяется незначительно, в чем и выражается стабилизирующее действие схемы.

Эквивалентная схема такого стабилизатора приведена на рис. 13,*б*. Здесь стабилитрон представлен как источник постоянного напряжения (равного напряжению стабилизации) с внутренним со-

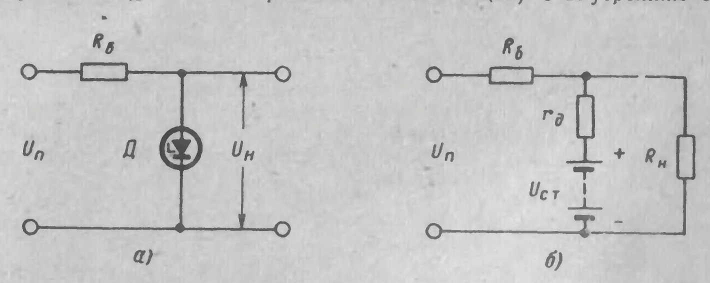


Рис. 13. Параметрический стабилизатор постоянного напряжения (*а*) и его эквивалентная схема (*б*).

противлением $r_д$, равным динамическому сопротивлению стабилитрона. В первом приближении сопротивлением нагрузки $R_н$ можно пренебречь, поскольку $r_д \ll R_н$. В этом случае выходное напряжение стабилизатора

$$U_н = \frac{U_п - U_{ст}}{R_б + r_д} r_д + U_{ст}. \quad (9)$$

Если считать, что напряжение $U_{ст}$ остается постоянным при изменении питающего напряжения $U_п$, то будет справедливо соотношение

$$\Delta U_н = \frac{r_д}{R_б + r_д} \Delta U_п. \quad (10)$$

Учитывая, что $R_б \gg r_д$,

$$\Delta U_н = \frac{r_д}{R_б} \Delta U_п, \quad (11)$$

где $\Delta U_п$ — изменение напряжения на нагрузке (выходного напряжения стабилизатора);

$\Delta U_п$ — изменение входного напряжения.

Отношение $\Delta U_п/\Delta U_н$ называют коэффициентом стабилизации напряжения; он показывает, во сколько раз изменение питающего напряжения превосходит изменение напряжения на нагрузке. С увеличением сопротивления балластного резистора коэффициент стабилизации возрастает. Однако увеличение сопротивления $R_б$ требует повышения напряжения питания, чтобы выходное напряжение стабилизатора осталось прежним. Это не всегда целесообразно, так как значительная часть потребляемой мощности рассеивается на балластном резисторе и к. п. д. схемы получается низким. Оптимальное сопротивление балластного резистора с достаточной точностью можно определить по формуле

$$R_б = \frac{U_п - U_{ст}}{I_р}, \quad (12)$$

где $I_р$ — расчетный ток, протекающий через стабилитрон, величина которого обычно лежит в следующих пределах:

$$I_{ст.мин} < I_р < I_{ст.макс}, \quad (13)$$

где $I_{ст.мин}$, $I_{ст.макс}$ — минимальный и максимальный токи стабилитрона соответственно. Обычно принимают $U_н = U_{ст}$. Пределы изменения входного напряжения, как правило, известны. Поэтому сопротивление $R_б$ выбирают таким, чтобы при максимальном значении питающего напряжения ток через стабилитрон был не более $I_{ст.макс}$.

Из соображений надежности работы стабилизатора при расчетах рекомендуется величину $I_{ст.макс}$ принимать на 20% меньше допустимой величины тока стабилизации полупроводникового прибора данного типа.

Из соотношения

$$\frac{U_{п.макс} - U_{ст}}{I_{ст.макс}} = \frac{U_п - U_{ст}}{I_р} \quad (14)$$

определяют расчетный ток стабилитрона:

$$I_р = I_{ст.макс} \frac{U_п - U_{ст}}{U_{п.макс} - U_{ст}}. \quad (15)$$

При этом необходимо проверить, выполняется ли условие:

$$I_{ст.мин} \leqslant \frac{U_{п.мин} - U_{ст}}{U_{п.макс} - U_{ст}} I_{ст.макс}. \quad (16)$$

После расчета сопротивления балластного резистора $R_б$ по формуле (12) определяют пределы изменения питающего напряжения, при котором выполняется условие $I_{ст.мин} < I_р < I_{ст.макс}$:

$$U_{п.макс} = U_{ст} + R_б I_{ст.макс}; \quad (17)$$

$$U_{п.мин} = U_{ст} + R_б I_{ст.мин}. \quad (18)$$

Важным параметром стабилизатора является максимально допустимый ток нагрузки, при котором стабилизация еще остается удовлетворительной (при данном типе стабилитрона). Он определяется из выражения

$$I_{н.макс} = \frac{U_п - U_{ст} - I_{ст.мин} R_б}{R_б}. \quad (19)$$

Максимальная выходная мощность стабилизатора определяется как произведение максимального тока в цепи нагрузки на выходное напряжение

$$P_{ст} = I_{н.макс} U_{ст}. \quad (20)$$

И, наконец, оценивается снижение пульсации на выходе стабилизатора. Если нагрузка чисто активная, то коэффициент пульсации по току численно равен коэффициенту пульсации по напряжению.

Если стабилизатор питается от однополупериодного выпрямителя с коэффициентом пульсации на выходе s_1, то коэффициент пульсации на выходе стабилизатора

$$s_{ст} = \frac{0,94 s_1 r_д}{R_б}. \qquad (21)$$

В случае питания от двухполупериодного выпрямителя с коэффициентом пульсации s_2

$$s_{ст} = \frac{0,47 s_2 r_д}{R_б}. \qquad (22)$$

Если нужно стабилизировать напряжение менее 5,6 *в*, то применяют включение диодов в прямом направлении, так как стабилитроны с напряжением стабилизации менее 5,6 *в* не изготовляют. При этом можно использовать не только стабилитроны, но и плоскостные выпрямительные диоды, например Д202—Д205, Д206—Д211, Д226—Д226В. Несколько диодов соединяют последовательно

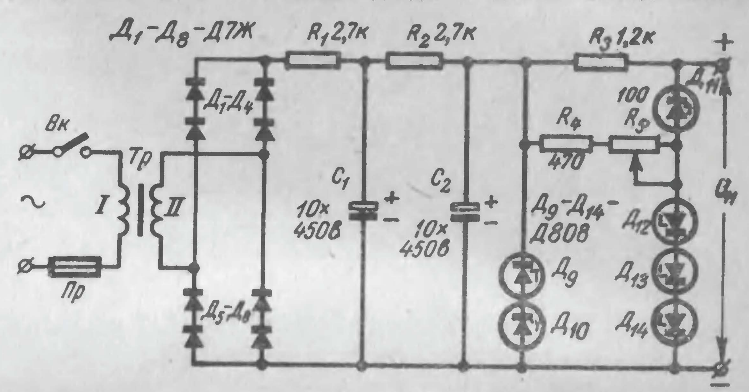


Рис. 14. Двухкаскадный параметрический стабилизатор напряжения с температурной компенсацией.

из расчета примерно 0,7—0,8 *в* стабилизируемого напряжения на каждый диод. Динамическое сопротивление диодов Д808—Д813 и Д202—Д205, включенных в проводящем направлении, имеет величину около 2 *ом* при токе 20 *ма*, 4 *ом* при 10 *ма* и 8 *ом* при 5 *ма*. Температурный коэффициент напряжения диодов и стабилитронов, включенных в проводящем направлении, отрицателен и по абсолютной величине больше ТКН для обычного включения стабилитронов.

Каскадный параметрический стабилизатор напряжения. В ряде случаев целесообразно использовать многокаскадные схемы параметрических стабилизаторов. На рис. 14 показана двухкаскадная схема низковольтного стабилизатора повышенной точности, имеющего следующие характеристики: выходное напряжение $U_н = 10$ *в*, максимальный ток нагрузки $I_{н.макс} = 2$ *ма*, коэффициент стабилизации 5 000, выходное сопротивление 5 *ом*, ТКН=0,001÷0,003 %/*град*, допустимые колебания напряжения сети ±10%.

Выходное напряжение в схеме по рис. 14 не регулируется и определяется напряжением $U_{ст}$ стабилитрона $Д_{11}$. Температурная компенсация схемы осуществляется диодами $Д_{12}$—$Д_{14}$, включенными в прямом направлении. Величина и знак ТКН могут быть подобраны с помощью потенциометра R_5 за счет изменения тока, протекающего через стабилитроны $Д_{12}$—$Д_{14}$. Для повышения точности температурной компенсации все диоды $Д_{11}$—$Д_{14}$ располагают рядом в одинаковых температурных условиях. Вторичная обмотка трансформатора рассчитана на напряжение 220 *в*.

В последнем каскаде многокаскадного параметрического стабилизатора напряжения целесообразно использовать прецизионный кремниевый стабилитрон из числа Д818 с отрицательным ТКН, поскольку ТКН стабилитронов предварительных каскадов положителен.

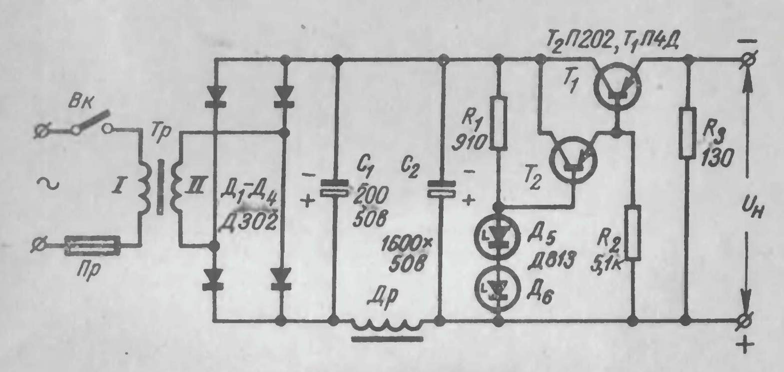


Рис. 15. Стабилизатор напряжения с транзисторами.

Компенсационные стабилизаторы напряжения. При необходимости получения больших диапазонов стабилизации при повышенной мощности в нагрузке используют стабилизаторы с усилительными элементами (обычно в виде транзисторов).

На рис. 15 показана схема стабилизатора с выходным напряжением 24 *в*, током нагрузки 0,2—2 *а* и выходным сопротивлением 0,3 *ом*. Стабилизатор представляет собой эмиттерный повторитель, в котором опорное напряжение задается кремниевыми стабилитронами $Д_5$ и $Д_6$ типа Д813. Выходное напряжение не регулируется и определяется выбранным типом стабилитронов. В связи с тем, что с изменением нагрузки стабилизатора ток через стабилитроны также изменяется в широких пределах, коэффициент стабилизации схемы невелик (около 15).

В качестве регулирующего элемента использован составной транзистор $Т_1$, $Т_2$, смонтированный на теплоотводящем радиаторе. Ввиду отсутствия в схеме термокомпенсирующих элементов стабилизатор работоспособен в ограниченном интервале температур.

На рис. 16 приведена схема стабилизатора напряжения, предназначенного для питания цепей накала ламп. Его выходное напряжение не регулируется и составляет 6,3 *в*, номинальный нагрузочный ток равен 3 *а*, коэффициент стабилизации не менее 15. Стабилизатор представляет собой эмиттерный повторитель с источником опорного напряжения на кремниевом стабилитроне $Д_6$ типа Д810, который питается от отдельного выпрямителя на диодах $Д_5$—$Д_8$.

Опорное напряжение, подаваемое в цепь базы транзистора T_4 регулирующего элемента, представляет часть напряжения стабилитрона, снимаемую с резистора R_3 делителя R_2—R_4.

Регулирующий элемент представляет собой двойной составной транзистор T_1—T_4. Для увеличения тока нагрузки стабилизатора применено параллельное соединение мощных транзисторов T_1 и T_2. Транзисторы T_1—T_3 монтируются на теплоотводящем радиаторе.

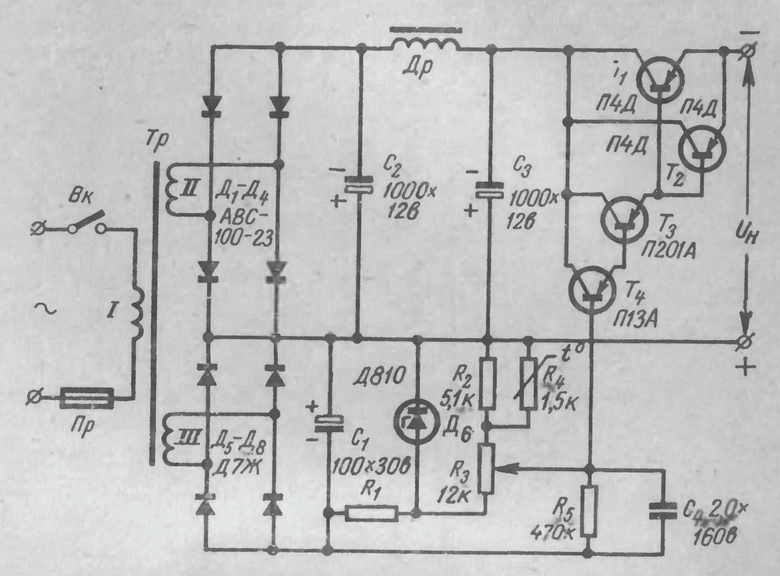


Рис. 16. Стабилизатор напряжения для питания цепей накала ламп.

Термокомпенсация схемы осуществляются полупроводниковым терморезистором типа ММТ-1 (R_4). Дроссель *Др* собран на сердечнике Ш20×20 из электротехнической стали и имеет 600 витков провода ПЭВ 1,0.

Важнейшей частью компенсационных стабилизаторов напряжения является измерительный элемент, фиксирующий отклонение напряжения на нагрузке от заданной величины. С измерительного элемента через усилитель напряжение подается на регулирующий элемент стабилизатора, который восстанавливает стабилизируемое напряжение до требуемого уровня.

На рис. 17 приведена схема низковольтного компенсационного стабилизатора с коэффициентом стабилизации, равным 2 000. Выходное напряжение стабилизатора 1,5 *в*, ток нагрузки 0—0,2 *а*, выходное сопротивление 0,00075 *ом*, ТКН 0,01 *мв/град*.

Стабилизатор собран по схеме с инверсионным опорным напряжением, что и позволило при низковольтном мощном выходе получить высокий коэффициент стабилизации. Измерительным элементом служит мостовая схема опорного напряжения, термокомпенсированная диодом, включенным в прямом направлении. Стабилитрон $Д_9$ в этой схеме является опорным, а стабилитрон $Д_8$ — термокомпенсирующим. Величина подаваемого на мост постоянного напряжения должна составлять 150 *в*.

Усилитель обратной связи собран на транзисторе T_5, нагрузкой которого служит токостабилизирующий элемент, состоящий из транзистора T_1, стабилитронов $Д_6$, $Д_7$ и резисторов R_1 и R_4. Для уменьшения выходного сопротивления в стабилизаторе применена положительная обратная связь по току с помощью резистора R_3. Регулирующий элемент представляет собой составной транзистор $T_2T_3T_4$. Начальные токи смещения транзисторов T_2 и T_3 задаются резисторами R_5 и R_7.

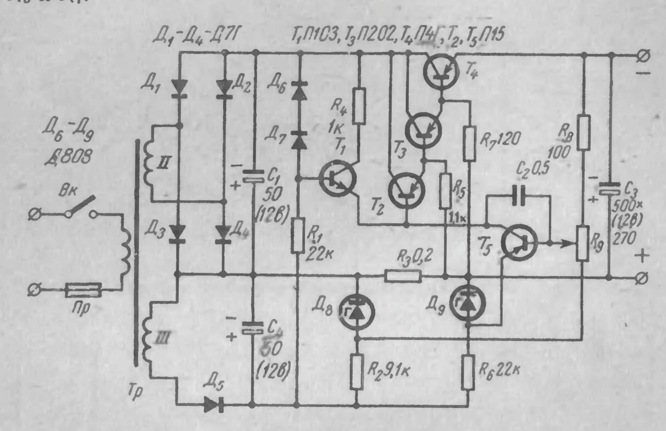


Рис. 17. Прецизионный низковольтный стабилизатор напряжения.

На рис. 18 приведена принципиальная схема стабилизированного источника питания с двумя выходными напряжениями. Напряжение $U_{н1}$, предназначенное для питания высоковольтных транзисторов, стабилизировано девятью соединенными последовательно кремниевыми стабилитронами Д811 ($Д_{13}$—$Д_{21}$), которые определяют выходные данные первого канала: напряжение 100 *в*, ток нагрузки 15 *ма*, выходное сопротивление 10 *ом*. Напряжение $U_{н2}$ можно регулировать в пределах 0,3—27 *в*. Нестабильность этого выходного напряжения менее 0,4% при изменении тока нагрузки от нуля до максимальной величины и при колебаниях напряжения сети ±15%. Выходное сопротивление низковольтного канала источника питания 0,01 *ом*.

Источником опорного напряжения является выпрямитель на диодах $Д_6$—$Д_9$ со стабилитронами $Д_{10}$—$Д_{12}$. Переменным резистором регулируют величину опорного напряжения. Напряжение на конденсаторе C_5 равно напряжению U_2, а на конденсаторе C_4 — пропорционально опорному. Эти два напряжения составляют регулирующее напряжение, поступающее в цепь базы транзистора T_1.

Усилитель выполнен на транзисторах T_1 и T_2. В регулирующем элементе использованы соединенные параллельно транзисторы T_3 и T_4, смонтированные на алюминиевом пластинчатом радиаторе размерами 210×190×6 *мм*. Радиатором для диодов Д302 служит шасси стабилизатора.

Сердечник трансформатора $Тр_1$ набран из пластин Ш40, толщина набора — 30 *мм*. Первичная обмотка *I* трансформатора содержит 1 050 витков провода ПЭВ 0,43, обмотка *II* — 20 витков провода ПЭЛ 0,15, обмотка *III*—580 витков провода ПЭЛ 0,2, обмотка *IV*— 130 витков провода ПЭВ 1,3. Обмотки трансформатора $Тр_2$ намотаны на сердечнике сечением 1 *см*², набранном из пластин Ш12. Об-

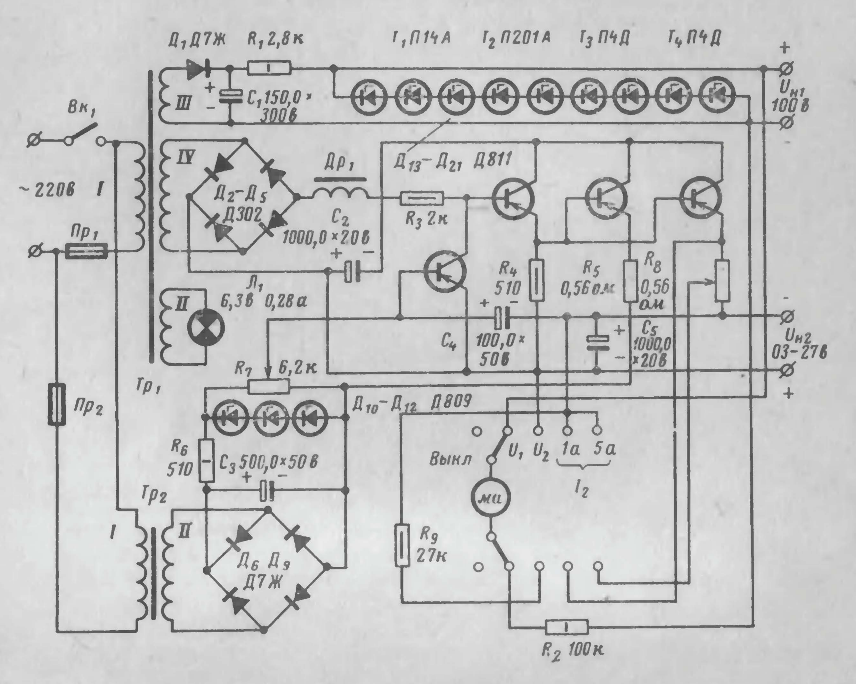


Рис. 18. Стабилизированный источник питания с двумя выходными напряжениями.

мотки содержат: *I* — 4 500 витков ПЭВ 0,06; *II* — 660 витков ПЭЛ 0,12, Дроссель $Др_1$ намотан на сердечнике сечением 6 *см*² (из пластин Ш30); его обмотка содержит 140 витков провода ПЭВ 2,0.

Стабилизаторы переменного напряжения. В радиолюбительской практике может оказаться необходимым стабилизировать переменное напряжение. Используя полупроводниковые стабилитроны, можно относительно просто построить такие стабилизаторы.

Одна из схем стабилизатора переменного напряжения на полупроводниковых стабилитронах приведена на рис. 19,*а*. Напряжение сети через трансформатор $Тр_1$ поступает на цепочку, образованную балластным резистором $R_б$ и встречно включенными стабилизаторами $Д_1$ и $Д_2$. Каждая полуволна переменного напряжения ограничивается на уровне напряжения стабилизации $U_{ст}$ стабилитронов $Д_1$ и $Д_2$, и в результате на выходе стабилизатора получается на-

пряжение $U_н$ трапецеидальной формы (рис. 19,*б*). При изменении величины входного напряжения амплитуда напряжения на нагрузке остается постоянной, а действующее значение последнего несколько изменяется за счет изменения площади трапеции (рис. 19,*б*). Коэффициент стабилизации такой схемы обычно не превосходит 5.

Если на выходное трапецеидальное напряжение наложить небольшое по величине переменное (компенсирующее) напряжение,

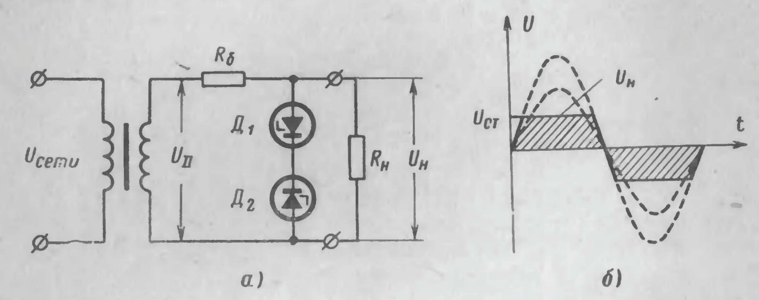


Рис. 19. Стабилизатор переменного напряжения (*а*) и форма его выходного напряжения (*б*).

пропорциональное входному и сдвинутое по фазе на 180°, то на нагрузке можно получить напряжение со стабильным действующим значением. На рис. 20 приведены схемы таких стабилизаторов. Компенсирующее напряжение $U_к$ может подаваться в схему из сети через отдельный трансформатор (рис. 20,*а*) или с части вторичной обмотки трансформатора питания (рис. 20,*б*). Величина компенсирующего напряжения приближенно может быть определена из соотношения:

$$U_к = U_{ст}\frac{U_{II}}{\Delta U_{II}}, \qquad (23)$$

где $U_{ст}$ — напряжение стабилизации стабилитрона;
U_{II} — напряжение на вторичной обмотке трансформатора питания (действующее значение);
ΔU_{II} — изменение этого напряжения.

Для расчета стабилизатора переменного напряжения можно использовать график на рис. 21. Если сопротивление нагрузки достаточно велико, действующее значение выходного напряжения $U_н$ можно определить непосредственно из диаграммы, задавшись напряжением стабилизации $U_{ст}$, падением напряжения на стабилитроне в прямом направлении $U_{пр}$ и зная напряжение вторичной обмотки трансформатора U_{II}.

Амплитуда переменного тока, протекающего через стабилитроны, определяется из выражения

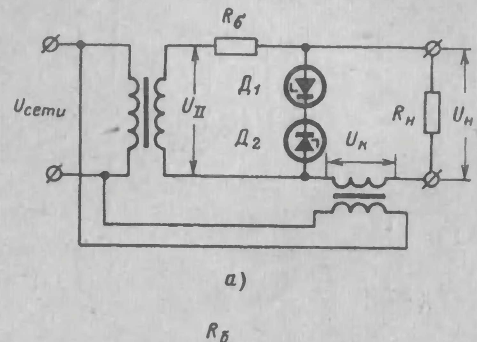
$$I_{ст m} = \frac{U_{IIm} - U_{ст}}{R_б}, \qquad (24)$$

где U_{IIm} — амплитуда напряжения вторичной обмотки трансформатора;
$R_б$ — сопротивление балластного резистора.

Величина $I_{стm}$ не должна превосходить максимально допустимой амплитуды тока стабилитрона $I_{ст.макс\,m}$, полученной из соотношения:

$$I_{ст.макс\,m} = \frac{2\sqrt{2}P_{ст}}{U_{ст}}, \tag{25}$$

где $P_{ст}$ — предельная мощность рассеяния стабилитрона при максимальной рабочей температуре.



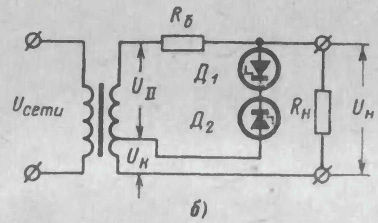


Рис. 20. Схемы для стабилизации действующего значения переменного напряжения.

Если сопротивление нагрузки $R_н$ невелико, необходимо учитывать падение напряжения на резисторе $R_б$. Тогда при определении параметров схемы по графику на рис. 21 вместо величины U_{II} необходимо откладывать величину

$$U'_{II} = U_{II}\frac{R_н}{R_б + R_н}. \tag{26}$$

В этом случае амплитуда тока стабилитрона

$$I_{стm} = \frac{U_{IIm} - U_{ст}\left(1 + \frac{R_б}{R_н}\right)}{R_б}. \tag{27}$$

Действительное напряжение на нагрузке будет меньше полученного из диаграммы на величину компенсирующего напряжения $U_к$.

Ограничители и формирователи импульсов. Наряду с основной областью использования в стабилизаторах напряжения и тока полупроводниковые стабилитроны широко применяют в импульсных схемах в качестве ограничителей и формирователей.

В табл. 5 приведены схемы ограничителей на кремниевых стабилитронах. Такие ограничители обладают высокими техническими характеристиками, так как сопротивление стабилитрона при напряжении, меньшем напряжения пробоя, обычно более 10 *Мом*, в режиме пробоя не превышает десятков ом, в прямом направлении при напряжении свыше 0,7 *в* — порядка 5—7 *ом*.

К недостаткам ограничителей на кремниевых стабилитронах следует отнести невозможность плавной регулировки уровня ограничения.

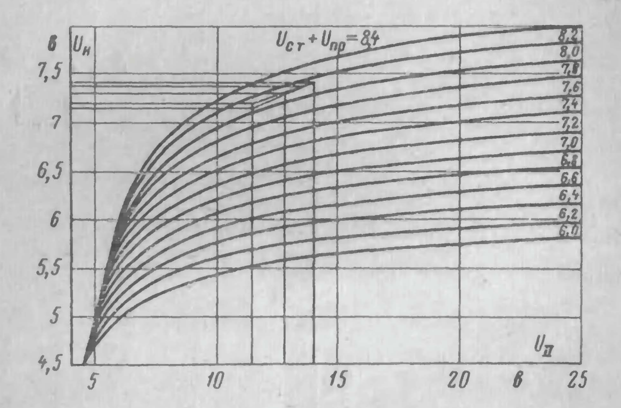


Рис. 21. График для расчета выходного напряжения стабилизатора.

В импульсных электронных схемах часто возникает необходимость получить импульсы разнообразной формы. Используя простую схему формирователя (схема 1 в табл. 6), состоящую из последовательно соединенных кремниевого стабилитрона $Д_1$, резистора R_1 и обычного выпрямительного диода $Д_2$, можно получить остроконечные импульсы. Если на вход формирователя подать синусоидальное напряжение, то на резисторе R_1 будет выделяться та часть положительной полуволны входного напряжения, которая лежит выше уровня стабилизации стабилитрона $Д_1$. Диод $Д_2$ предназначен для выделения импульсов нужной полярности.

При необходимости иметь на выходе формирователя остроконечные импульсы обеих полярностей используют схему 2 (табл. 6), в которой вместо обычного выпрямительного диода применен стабилитрон $Д_2$.

Длительность импульсов $\tau_{имп}$, получаемых с помощью этих схем формирователей, можно определить из соотношения

$$\tau_{имп} = \frac{0,2 + 2,2U_2/U_1}{\pi f}, \tag{28}$$

где U_1 — амплитуда напряжения на входе формирователя;
f — частота входного напряжения;
U_2 — амплитуда импульса, получаемого на выходе.

Таблица 5

Ограничители на полупроводниковых стабилитронах

№ п/п.	Назначение ограничителя	Схема ограничителя	Форма входного напряжения	Форма выходного напряжения	Амплитуда выходного напряжения
1	Параллельный ограничитель сигналов положительной полярности	R; U_1; Д; U_2	U_1; $U_{ст}$; t	U_2; U_{2m}; t	$U_{2m} = U_{ст}$
2	Параллельный ограничитель сигналов отрицательной полярности	R; U_1; Д; U_2	U_1; t; $U_{ст}$	U_2; t; U_{2m}	$U_{2m} = U_{ст}$
3	Параллельный двусторонний ограничитель	R; $Д_1$; U_1; U_2; $Д_2$	U_1; $U_{ст2}+U_{пр1}$; t; $U_{ст1}+U_{пр2}$	U_2; U'_{2m}; t; U''_{2m}	$U'_{2m} = U_{ст2} + U_{пр1}$ $U''_{2m} = U_{ст1} + U_{пр2}$
4	Последовательный ограничитель сигналов положительной полярности	Д; R; U_1; U_2	U_1; U_{1m}; $U_{ст}$; t	U_2; U_{2m}; t	$U_{2m} = U_1 - U_{ст}$

№ п/п.	Назначение ограничителя	Схема ограничителя	Форма входного напряжения	Форма выходного напряжения	Амплитуда выходного напряжения
5	Последовательный ограничитель сигналов отрицательной полярности				$U_{2m} = U_1 - U_{ст}$
6	Последовательный двусторонний ограничитель				$U'_{2m} = U'_1 - (U_{ст2} + U_{пр1})$ $U''_{2m} = U''_1 - (U_{ст1} + U_{пр2})$
7	Ограничитель, выделяющий среднюю часть входного сигнала положительной полярности				$U_{2m} = U_{ст1} - U_{ст2}$
8	Ограничитель, выделяющий среднюю часть входного знакопеременного сигнала				$U'_{2m} = U_{ст2} - U_{ст4} + U_{пр1} - U_{пр3}$ $U''_{2m} = U_{ст1} - U_{ст3} + U_{пр2} - U_{пр4}$

Таблица 6

Формирователи импульсов на полупроводниковых стабилитронах

№ п/п.	Назначение формирователя	Схема формирователя	Форма входного напряжения	Форма выходного напряжения	Амплитуда выходного напряжения
1	Формирование остроконечных импульсов положительной полярности				$U_{2m} = U_{1m} - U_{ст} - U_{пр}$
2	Формирование остроконечных импульсов обеих полярностей				$U'_{2m} = U'_{1m} - U_{ст1} - U_{пр2}$ $U''_{2m} = U''_{1m} - U_{ст2} - U_{пр1}$
3	Формирование остроконечных импульсов				$U_{2m} = (U_{1m} - U_{ст})\beta \times \frac{R_1}{r_д + r_б + (1+\beta) r_э}$
4	Формирование прямоугольных импульсов положительной полярности				$U_{2m} = U_{ст}$

№ п/п.	Назначение формирователя	Схема формирователя	Форма входного напряжения	Форма выходного напряжения	Амплитуда выходного напряжения
5	Формирование остроконечных импульсов положительной полярности				$U_{2m} = U_{ст}$
6	Формирование переменного напряжения прямоугольной формы				$U'_{2m} = U_{ст1} + U_{пр2}$ $U''_{2m} = U_{ст2} + U_{пр1}$
7	Формирование пилообразного напряжения				—
8	Формирование пилообразного напряжения с регулируемой постоянной составляющей				—

Однако коэффициент использования входного напряжения в подобных схемах формирователей чрезвычайно низок.

Формирователь остроконечных импульсов на полупроводниковом стабилитроне и транзисторе (схема 3) имеет коэффициент передачи больше единицы; при входном переменном напряжении 6 *в* на выходе получаются импульсы с амплитудой 15 *в* длительностью до 0,2 *мсек*.

Для получения импульсов прямоугольной формы используют цепочку, состоящую из резистора R и стабилитрона $Д_1$ (схема 4). При подаче на вход такого формирователя синусоидального напряжения, амплитуда которого значительно превышает напряжение стабилизации стабилитрона, на выходе формирователя получаются импульсы практически прямоугольной формы. Если амплитуда входного напряжения превосходит напряжение стабилизации в 2—3 раза, выходное напряжение имеет трапецеидальную форму.

При введении в последнюю схему дифференцирующей цепочки C_3R_2 (схема 5) на выходе можно получить остроконечные импульсы. Здесь диод $Д_2$ служит для выделения импульсов определенной полярности. Для четкой работы этой схемы необходимо, чтобы входное напряжение было значительно больше напряжения стабилизации стабилитрона. Поэтому с целью уменьшения потерь на резисторе R_1 в схему введены конденсаторы C_1 и C_2. Одновременно они осуществляют развязку по постоянному току выхода формирователя от входа. Изменяя соотношение емкостей C_1 и C_2 и сопротивление резистора R_1, можно регулировать фазу выходных импульсов относительно входного напряжения.

Для получения переменного напряжения прямоугольной формы можно использовать цепочку, состоящую из резистора R_1 и встречно включенных стабилитронов $Д_1$ и $Д_2$ (схема 6 в табл. 6).

Если в такую схему добавить интегрирующую цепочку R_2C_3 (схема 7), то на выходе устройства получим пилообразное напряжение.

Чтобы получить пилообразное напряжение с регулируемой постоянной составляющей, необходимо изменять постоянные времени заряда и разряда конденсатора C_1 интегрирующей цепочки. Введение потенциометра R_2 и диода $Д_3$ (схема 8) позволяет изменять постоянные времени заряда и разряда конденсатора C_1, изменяя положение щетки потенциометра.

Применение стабилитронов в усилителях постоянного и переменного тока. Как сказано выше, динамическое сопротивление стабилитронов значительно меньше статического. Это свойство стабилитронов позволяет использовать их в качестве элементов связи или развязывающих элементов в усилителях постоянного тока или в усилителях низкой частоты.

Резистор автоматического смещения в цепи катода электронной лампы значительно ослабляет усиление каскада. Это ослабление уменьшают путем включения параллельно резистору смещения блокировочного конденсатора, емкость которого выбирается из условия

$$C_к = \frac{(300 \div 500)\, S_д}{f}\ [мкф], \quad (29)$$

где $S_д$ — крутизна динамической характеристики лампы, *ма/в*;

f — минимальная рабочая частота, *гц*.

Из этой формулы следует, что для нормальной работы усилителя при понижении нижнего предела частот емкость нужно увеличить. При усилении сигналов весьма низких частот расчетные значения емкости оказываются очень большими и поэтому в ряде случаев (например, в усилителях постоянного тока) отказываются от применение конденсатора $C_к$ или берут его с относительно малой емкостью, допуская тем самым снижение коэффициента усиления каскада.

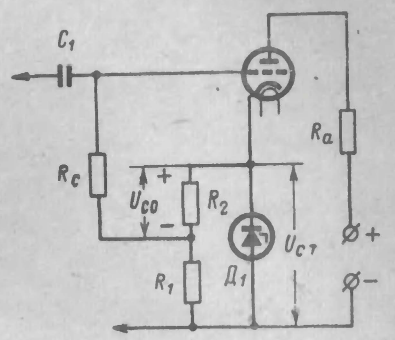


Рис. 22. Усилительный каскад со стабилитроном в цепи смещения.

При недостаточной величине емкости конденсатора $C_к$ коэффициент усиления низкочастотного каскада на нижних рабочих частотах меньше, чем на средних, вследствие этого появляются частотные искажения.

Для создания автоматического смещения вместо резистора в цепь катода можно включить кремниевый стабилитрон. Если катодный ток лампы превышает минимальный ток стабилизации стабилитрона, то напряжение на последнем изменяется незначительно, так как динамическое сопротивление стабилитрона на этом участке характеристики мало. При этом ослабление сигнала, определяемое величиной $1+S_{дк}R_{дин}$, практически отсутствует.

Если напряжение стабилизации $U_{ст}$ выше необходимого напряжения смещения U_{c0}, то можно применить делитель напряжения R_1—R_2 (рис. 22), удовлетворяющий условию:

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{U_{c0}}{U_{ст}}. \quad (30)$$

Сумму сопротивлений резисторов R_1+R_2 выбирают такой, чтобы ток через делитель был не более 10—20% катодного тока лампы. Следует избегать работы стабилитрона вблизи перегиба вольт-амперной характеристики вследствие того, что здесь возрастает динамическое сопротивление и повышается уровень шумов.

Применение стабилитронов во вспомогательных цепях транзисторных усилительных каскадов также весьма перспективно, поскольку электролитические конденсаторы, применяемые для связи между транзисторными каскадами и в развязывающих цепях, имеют невысокую надежность, особенно при колебаниях температуры. На рис. 23 приведена схема транзисторного усилительного каскада со стабилитроном $Д_1$ вместо переходной емкости и стабилитроном $Д_2$ вместо конденсатора цепи развязки. Кремниевый стабилитрон, примененный в качестве элемента междукаскадной связи, служит одновременно термокомпенсирующим элементом транзисторного каскада. Действительно, при увеличении температуры транзистора структуры *n-p-n* происходит дополнительное положительное смещение за счет увеличения обратного тока. Однако увеличивающееся напряжение стабилизации кремниевого стабилитрона уменьшает это смещение.

Схемы с защитой от перегрузок. Полупроводниковые стабилитроны можно использовать для защиты радиоэлектронной аппаратуры или отдельных ее элементов от перегрузок. Постоянство падения напряжения на кремниевом стабилитроне в области пробоя делает

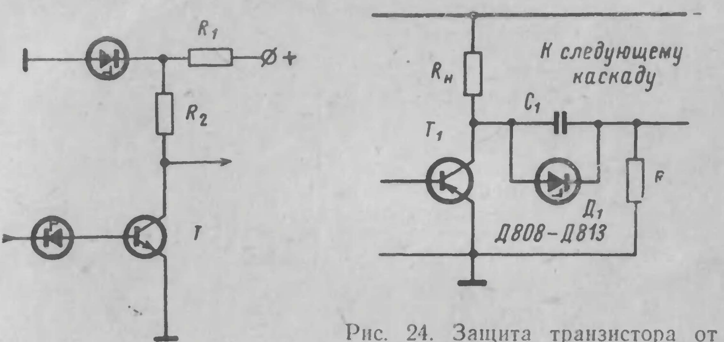


Рис. 23. Кремниевые стабилитроны в качестве элемента связи и в цепи развязки транзисторного усилителя.

Рис. 24. Защита транзистора от перенапряжения.

его точным ограничительным элементом защитных схем. Высокая скорость переключения, достигаемая во время пробоя, позволяет создавать быстродействующие защитные системы. Защита чувствительных к перегрузкам элементов наиболее просто осуществляется параллельным подключением к нагрузке кремниевого стабилитрона, напряжение стабилизации которого ниже предельно допустимого для данной нагрузки.

Для защиты транзистора от случайных перенапряжений в усилительном каскаде можно использовать схему, показанную на рис. 24.

Напряжение коллектор—эмиттер $U_{к.э}$ (в нормальном режиме усиления оно равно $U_к - I_к R_н$) выбирается меньше предельно допустимого значения для данного типа транзистора. Вместе с тем напряжение $U_{к.э}$ выбирается таким образом, чтобы оно было меньше напряжения стабилизации диода. Тогда при нормальной работе каскада сопротивление стабилитрона настолько велико, что он практически не влияет на режим каскада. В случае неисправности в цепи базы ток $I_к$ может уменьшиться, а напряжение между коллектором и эмиттером возрасти до величины, близкой к $U_к$, вызывая перегрузку транзистора. Стабилитрон при этом шунтирует транзистор, предохраняя его от повреждения. В усилителях низкой частоты можно шунтировать стабилитроном участок коллектор — эмиттер. В широкополосном усилителе это может ухудшить его частотную характеристику, так как стабилитрон имеет емкость.

Кратко рассмотренные примеры применения полупроводниковых стабилитронов далеко не исчерпывают возможностей использования их в радиолюбительской практике.

ОГЛАВЛЕНИЕ